

# Entwicklung neuer Prozeduren zur Elementbestimmung und Speziation in Vanadium Redox Flow Batterien

*C. Lutz, U. E. A. Fittschen*

*Technische Universität Clausthal, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland*

*christian.lutz@tu-clausthal.de*

---

## Abstract

Die Vanadium Redox Flow Batterie (VRFB) hat ein großes Potenzial als kommerzielles elektrochemisches Energiespeichersystem eingesetzt zu werden, aufgrund von ausgezeichneten Eigenschaften wie zum Beispiel einer langen Lebensdauer sowie einer theoretisch unendlich hohen Kapazität. Die am meiste verwendete Membran in VRFB ist Nafion™ (DuPont), welche neben mehreren positiven Eigenschaften wie einer guten chemischen und mechanischen Stabilität auch eine sehr schlechte Ionenselektivität besitzt. Aufgrund dieser schlechten Ionenselektivität werden nicht nur Protonen, sondern auch Vanadium-Ionen durch die Nafion Membran transportiert. Die Folgen dieses Prozesses, auch Crossover genannt, sind in der Regel über mehrere Lade-Entlade-Zyklen eine Zunahme der Vanadium-Menge im Positiven Elektrolyten (PE), eine Volumenzunahme des PE, die Selbstentladung der Batterie sowie schlussendlich die Abnahme der Kapazität. Die genauen Transportprozesse von Vanadium-Ionen durch die Membran sind noch nicht verstanden. Dies wird unterstrichen durch die publizierten Diffusionskoeffizienten der Vanadium-Spezies. Zum Beispiel befinden sich die veröffentlichten Diffusionskoeffizienten von  $V^{II}$  zwischen  $3,13 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  und  $9,44 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Für ein besseres Verständnis der Transportvorgänge in der Membran einer VRFB, fokussiert sich unsere Arbeit auf die Entwicklung neuer Prozeduren für die Elementbestimmung und Speziation von Vanadium in VRFB mittels Photometrie und Labor-Röntgen-Nahkanten-Absorptions-Spektroskopie (XANES). In der folgenden Arbeit wird gezeigt, dass Nafion™ 117 bei 18 °C  $22,89 \pm 0,58 \%$  Wasser aufnimmt und nach einer Konditionierung in einem Vanadium-Elektrolyten die wässrige Phase des Nafion™ eine Vanadium-Konzentration von  $1,029 \pm 0,024 \text{ mol kg}^{-1}$  aufweist. Der Gehalt auf die hydrierte Membran bezogen beträgt  $0,192 \pm 0,004 \text{ mol kg}^{-1}$ , welcher  $\lambda = n(V)/n(\text{SO}_3) = 0,211 \pm 0,005$  entspricht. Zusätzlich wird gezeigt, dass sich sowohl die Photometrie als auch die Labor-XANES zur direkten Speziation von Vanadium in Nafion™ eignen.

---

## 1. Einleitung

Seit mehreren Jahrzehnten ist die weltweite Stromversorgung im Wandel. Die fossilen Energieträger sollen in Zukunft minimiert werden und die Anzahl der erneuerbaren Energien steigt stetig. Die Herausforderung an erneuerbaren Energien ist, dass die Erzeugung der Energie auf Grund ihres natürlichen Hintergrundes unbeständig ist. Angesichts der Unbeständigkeit der erneuerbaren Energien kommt es bei hohen Produktionen und geringer Nachfrage immer häufiger zu einem Überangebot und demzufolge zu negativen Strompreisen. Aus diesem Grund sind Energiespeichersysteme notwendig [1]. In den letzten Jahren hat die Vanadium Redox Flow Batterie (VRFB) ein großes Potenzial als kommerzielles Energiespeichersystem gezeigt, weil sie mehrere ausgezeichnete Eigenschaften besitzt wie zum Beispiel keine Kreuzkontamination, eine lange Lebensdauer, eine hohe Energieeffizienz und eine theoretisch unendlich hohe Kapazität [1,2].

Die VRFB besteht aus zwei Halbzellen die durch eine Membran separiert sind und jeweils mit einem Elektrolytentank verbunden sind. Während des Betriebs wird der Elektrolyt aus den Tanks permanent durch die Halbzellen gepumpt. Beim Laden wird in der negativen Elektrode (NE)  $V^{III}$  zu  $V^{II}$  reduziert und in der positiven Elektrode (PE) wird  $V^{IV}$  zu  $V^V$  oxidiert. Beim Entladen laufen die Reaktionen umgekehrt ab.

Die am häufigste eingesetzte Membran in VRFB ist Nafion<sup>TM</sup> von DuPont. Einige ihrer positiven Eigenschaften sind die chemische sowie mechanische Stabilität sowie eine hervorragende Protonenleitfähigkeit. Jedoch besitzt Nafion<sup>TM</sup> auch zwei kritische Nachteile, den hohen Preis sowie eine sehr schlechte Ionenselektivität. Aufgrund der schlechten Ionenselektivität werden nicht nur Protonen, sondern auch V-Ionen durch die Membran transportiert. Dieser Prozess wird als V-Crossover bezeichnet. Im Fall von Nafion<sup>TM</sup> steigt die netto V-Menge generell über mehrere Lade-Entlade-Zyklen im PE und sinkt im NE. Auf den V-Crossover folgt zusätzlich ein Wassertransport durch die Membran sowie Selbstentladungsreaktionen. Auch beim Wassertransport nimmt das Volumen im Fall von Nafion<sup>TM</sup> im PE zu und nimmt im NE ab. Die drei beschriebenen Vorgänge tragen ausschlaggebend zum Kapazitätsverlust der VRFB bei [3].

Es wird deutlich, dass die Leistung einer VRFB stark abhängig von den Membranen ist und aus diesem Grund ist es wichtig, dass diese weiterentwickelt werden. Für die gezielte wissensbasierte Umsetzung müssen als Erstes die Transportvorgänge in der Membran verstanden werden. Zum derzeitigen Zeitpunkt wird in der Literatur deutlich, dass dies nicht der Fall ist. In Abb. 1 sind Diffusionskoeffizienten der Vanadium-Spezies von Sun et al. [3], Luo et al. [4], Knehr et al. [5], Gandomi et al. [6] und Elgammel et al. [7] zusammengefasst.

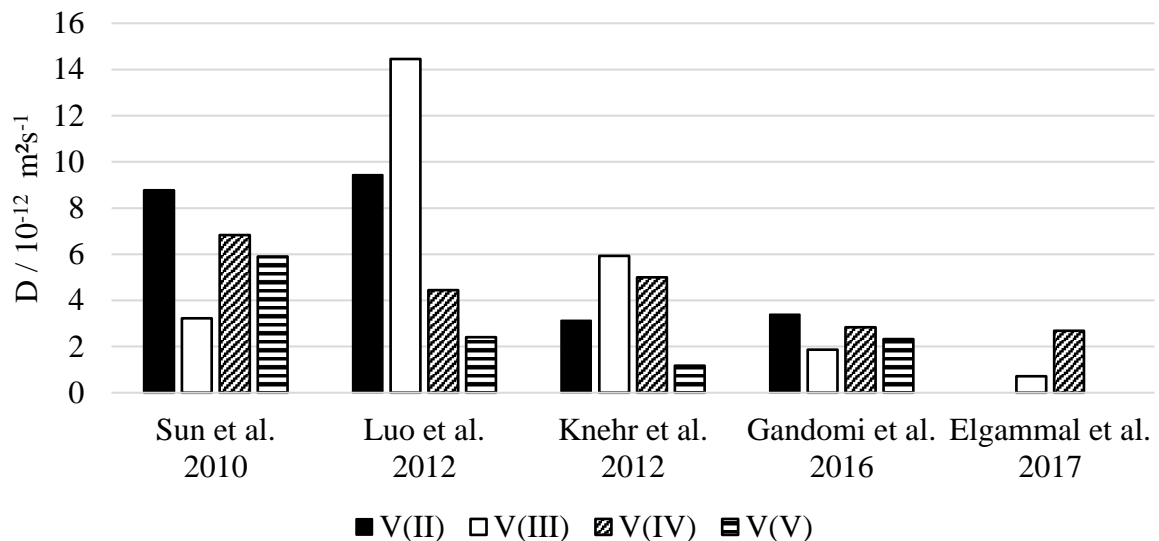


Abb. 1: Diffusionskoeffizienten der Vanadium-Spezies von Sun et al., Luo et al., Knehr et al., Gandomi et al. und Elgammal et al.

Die zusammengefassten Diffusionskoeffizienten zeigen aufgrund ihrer nicht Vergleichbarkeit in Hinblick auf die Größenordnung sowie Reihenfolge, dass die Transportgänge bisher nicht verstanden werden.

Unsere Arbeit fokussiert sich in erster Linie auf die Entwicklung neuer analytischer Prozeduren zur Elementbestimmung sowie Speziation von V in VRFB. Buckley et al. [8] und Choi et al. [9] haben gezeigt, dass die Photometrie eine geeignete Methode für die Elementbestimmung und Speziation des V-Elektrolyten ist. Blanc et al. [10] hat festgestellt, dass  $V^{IV}$  und  $V^V$  ein Dimer bilden. Durch die starke Absorption des Dimers ist die Quantifizierung des PE mittels Photometrie zurzeit nicht möglich. Als weitere Methode dient die Röntgen-Nahkanten-Absorptions-Spektroskopie (XANES, engl. X-ray absorption near edge structure spectroscopy). Jia et al. [11] hat XANES schon erfolgreich zur in-situ Bestimmung des Ladezustandes einer VRFB angewandt. Durch Entwicklungsarbeiten von Unternehmen wie Sigray und easyXAFS ist es auch möglich XANES-Messungen nicht nur am Synchrotron durchzuführen, sondern auch in naher Zukunft im Labor. Mit Hilfe der entwickelten Prozeduren, soll unsere Arbeit zur Aufklärung der Transportvorgänge in Nafion<sup>TM</sup> und anderen Membranen beitragen und schlussendlich in Zusammenarbeit mit Frau Prof. Beuermann (Technische Universität Clausthal, Technische Chemie) günstigere und leistungsfähigere Membranen entwickelt werden.

Im Folgenden sind die ersten Arbeiten des Projektes zusammengefasst.

## 2. Experimenteller Teil

### 2.1 Vorbehandlung von Nafion™

Verwendet wurde Nafion™ 117 (DuPont, Wilmington, USA) mit einer Dicke von 183  $\mu\text{m}$ . Die erhaltene Membran wurde in Streifen mit einer Größe von 5  $\text{cm}^2$  zugeschnitten und dann nacheinander bei 85 °C für 60 min in 3% Wasserstoffperoxid, Reinstwasser, 1 mol  $\text{L}^{-1}$  Schwefelsäure und Reinstwasser ausgekocht. Für die Herstellung des 3% Wasserstoffperoxid diente 30% Wasserstoffperoxid (Merck, Darmstadt, Deutschland). Die 1 mol  $\text{L}^{-1}$  Schwefelsäure wurde aus einer 95% - 96% konzentrierten Schwefelsäure (Merck, Darmstadt, Deutschland) hergestellt. Die Anlage Elga Purelab Flex 4 (Veolia, Paris, Frankreich) lieferte Reinstwasser. Nach der Vorbehandlung wurden die Membranstreifen in Reinstwasser gelagert.

### 2.2 Wasseraufnahme von Nafion™

Die unvorbehandelten Membranstreifen wurden vor Beginn des Versuches mit der Laborwaage ENTRIS (Sartorius, Göttingen, Deutschland) gewogen und dann in Reinstwasser bei 18 °C für 3h, 6 h, 12 h, 24 h, 48 h und 72 h konditioniert. Dies wurde mit jeweils sechs Wiederholungen durchgeführt. Nach Ablauf der vorgegebenen Zeit wurden die Membranstreifen aus dem Wasser genommen, das Wasser auf der Membranoberfläche wurde mit einem Labortuch entfernt und die Membranstreifen gewogen.

### 2.3 Präparation von Nafion™ mit V-Elektrolyt

Die vorbehandelten Membranstreifen wurden für 72 h jeweils in  $\text{V}^{\text{II}}$ -Elektrolyt,  $\text{V}^{\text{III}}$ -Elektrolyt,  $\text{V}^{\text{IV}}$ -Elektrolyt,  $\text{V}^{\text{V}}$ -Elektrolyt und  $\text{V}^{\text{IV}}$ - $\text{V}^{\text{V}}$ (1:1)-Elektrolyt eingelegt. Das Energie Forschungszentrum stellte elektrochemisch die V-Elektrolyten her. Als Basis diente ein  $\text{V}^{\text{III}}$ - $\text{V}^{\text{IV}}$ (1:1)-Elektrolyt (GfE, Nürnberg, Deutschland) mit einer V-Konzentration von 1,6 mol  $\text{L}^{-1}$  und Schwefelsäure-Konzentration von 4 mol  $\text{L}^{-1}$ . Nach der vorgegebenen Zeit wurden die Membranstreifen aus dem Elektrolyten genommen und der Elektrolyt auf der Membranoberfläche wurde mit einem Labortuch entfernt.

### 2.4 V-Konzentrationsbestimmung in Nafion™ mittels GF-AAS

Die mit  $\text{V}^{\text{IV}}$ -Elektrolyt präparierten Membranstreifen (s. 2.3) wurden bei 100 °C für 60 min in 4 mol  $\text{L}^{-1}$  Schwefelsäure ausgekocht. Dies wurde mit drei Wiederholungen durchgeführt. Die erhaltene Lösung, die praktisch alle V-Ionen enthält, wurde mittels Graphitrohr-Atomabsorptionsspektrometrie (GF-AAS) analysiert. Verwendet wurde das GF-AAS SIMAA 6000 (Perkin Elmer, Waltham, USA). Als Modifier wurde Magnesiumnitrat (Merck, Darmstadt, Deutschland) verwendet.

### 2.5 *V-Speziation in Nafion™ mittels Photometrie*

Zur Messung mittels Photometrie wurden die präparierten Membranstreifen aus 2.3 in den Strahl des Photometers platziert. Als Photometer wurde das Zweistrahlgerät LAMBDA 40 (Perkin Elmer, Waltham, USA) verwendet. Gemessen wurde von 300 nm bis 900 nm. Zur Untergrundkorrektur und als Referenz wurde Nafion™, welche für 72 h in 4 mol L<sup>-1</sup> Schwefelsäure eingelegt wurde, verwendet.

### 2.6 *V-Speziation in Nafion™ mittels XANES*

Die präparierten Membranstreifen aus 2.3 wurden vom Unternehmen Sigray (Concord, USA) vermessen. Verwendet wurde das XANES-Gerät QUANTUMLEAP (Sigray, Concord, USA). Als Referenz wurde zusätzlich eine V-Folie (Goodfellow, Huntingdon, England) vermessen. Die Messdauer für die V-Folie betrug 22,5 min und für die mit V<sup>V</sup>-Elektrolyt präparierte Membran 3,37 h.

## 3. **Ergebnisse und Diskussion**

Bisher ist es nicht eindeutig wie und, im Fall vom Dimer, ob die V-Spezies durch Nafion™ transportiert werden. Gut untersucht ist hingegen, dass der Wassergehalt der Membran einen entscheidenden Einfluss auf die Ionenleitfähigkeit hat [12]. Je mehr Wasser aufgenommen wird desto leitfähiger ist generell die Membran. Um den Transport untersuchen zu können ist es notwendig die V-Konzentration und die Gehalte der V-Spezies in der Membran bestimmen zu können. Im Folgenden werden die von uns verfolgten Prozeduren und Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

### 3.1 *Wasseraufnahme von Nafion™*

Die V-Konzentration in der Membran kann mittels Extraktionsverfahren (s. 2.4) und Normierung auf den Wassergehalt der Membran bestimmt werden. Deshalb wurde wie in 2.2 beschrieben, der Wassergehalt bestimmt. In Abb. 2 sind die Ergebnisse der Wasseraufnahme von Nafion™ dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass Nafion™ nach 72 h mit Wasser gesättigt ist und die Membran einen Wassergehalt  $22,89 \pm 0,58$  Massen% aufweist. Onishi et al. [13] hat einen sehr ähnlichen Wassergehalt von 22,93 Massen% bestimmt.

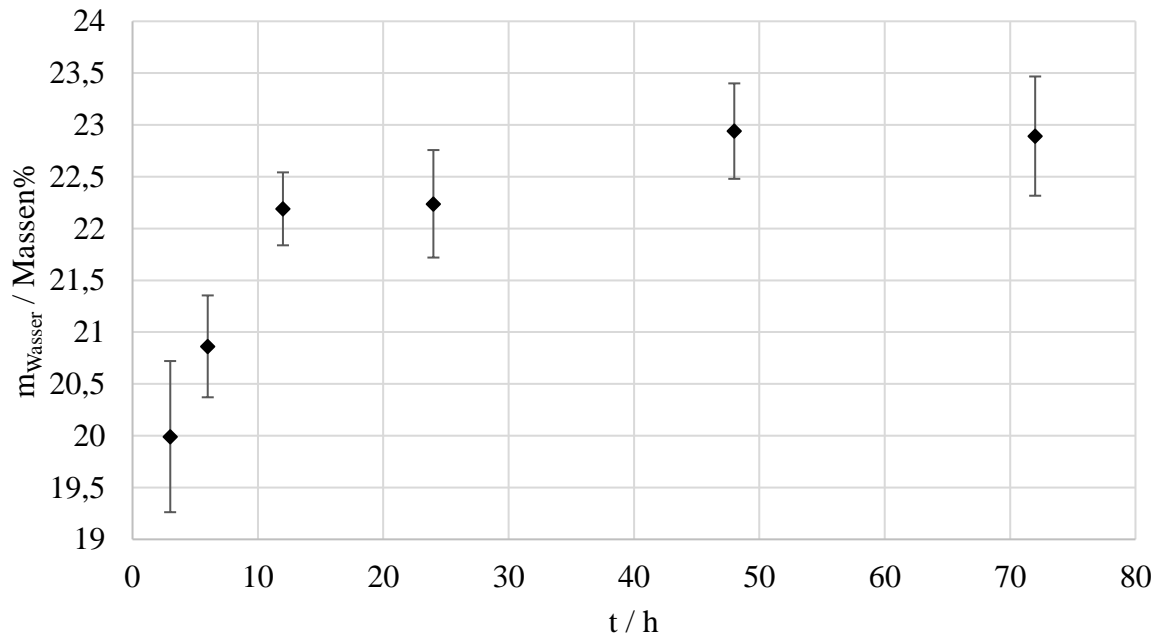


Abb. 2: Wasseraufnahme von Nafion™ bei 18 °C über einen Zeitraum von 3 h bis 72 h (n=6)

### 3.2 V-Konzentrationsbestimmung in Nafion™ mittels GF-AAS

Aus den bestimmten Wassergehalt von Nafion™ sowie der ermittelten Werten mittels GF-AAS ergeben sich für die V-Konzentration in der wässrigen Phase der Membran ein Gehalt von  $1,029 \pm 0,02 \text{ mol kg}^{-1}$  (n=3). Anhand der ermittelten V-Konzentration und der ermittelten Wasseraufnahme ergibt sich für die hydrierte Nafion Membran eine V-Konzentration von  $0,192 \pm 0,004 \text{ mol kg}^{-1}$  (n=3). Das entspricht  $\lambda = n(\text{V})/n(\text{SO}_3) = 0,211 \pm 0,005$  (n=3).

Die ermittelten Gehalte sind vergleichbar mit den bestimmten V-Konzentration von Elgammel et al. [7] in Höhe von  $\lambda = n(\text{V})/n(\text{SO}_3) = 0,20$ . Zusätzlich wird deutlich, dass sich die hier beschriebene Prozedur, bei der die Membran in Schwefelsäure ausgekocht wird, und die Prozedur aus [7], bei der die Membran für mehrere Tage in Salpetersäure extrahiert wird, sich für die Extraktion von V-Ionen eignen.

### 3.3 V-Speziation in Nafion™ mittels Photometrie

Bisher wurden die V-Spezies generell mit der Photometrie im Elektrolyten bestimmt. Dies ist qualitativ relativ problemlos möglich, stößt aber bei der quantitativen Bestimmung des PE an Grenzen.

Hier untersuchen wir, ob die V-Spezies in der Membran sich ebenfalls mittels Photometrie bestimmen lassen. In Abb. 3 und 4 sind beispielhafte photometrischen Spektren

des  $V^{II}$ -Elektrolyten, des  $V^{III}$ -Elektrolyten, des  $V^{IV}$ -Elektrolyten, des  $V^V$ -Elektrolyten und des  $V^{IV}$ - $V^V$ (1:1)-Elektrolyten in Nafion<sup>TM</sup> zusammengefasst.

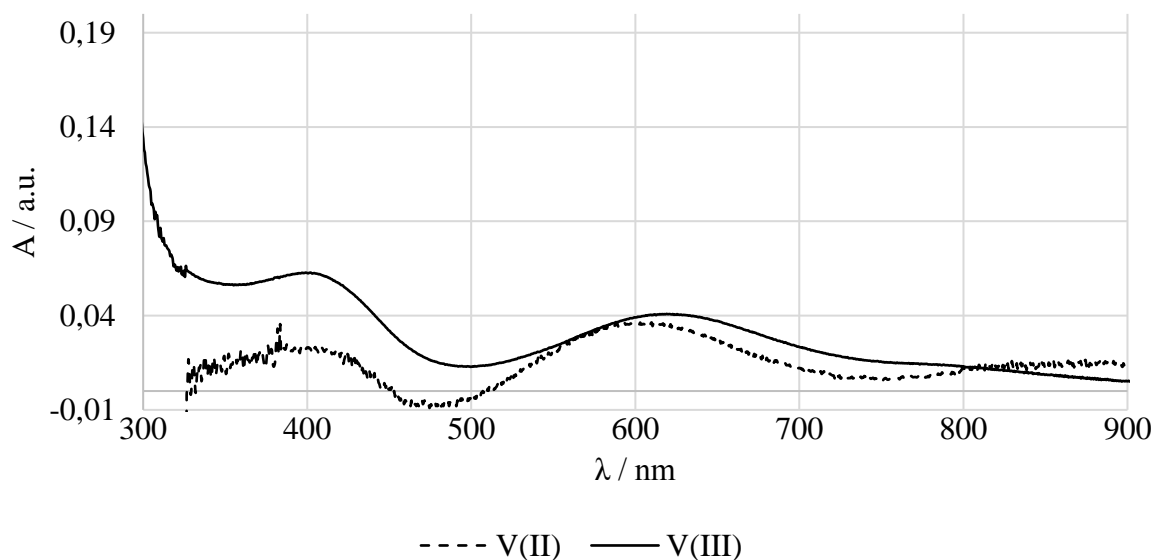


Abb. 3: photometrische Spektren des  $V^{II}$ -Elektrolyt und des  $V^{III}$ -Elektrolyt in Nafion<sup>TM</sup>

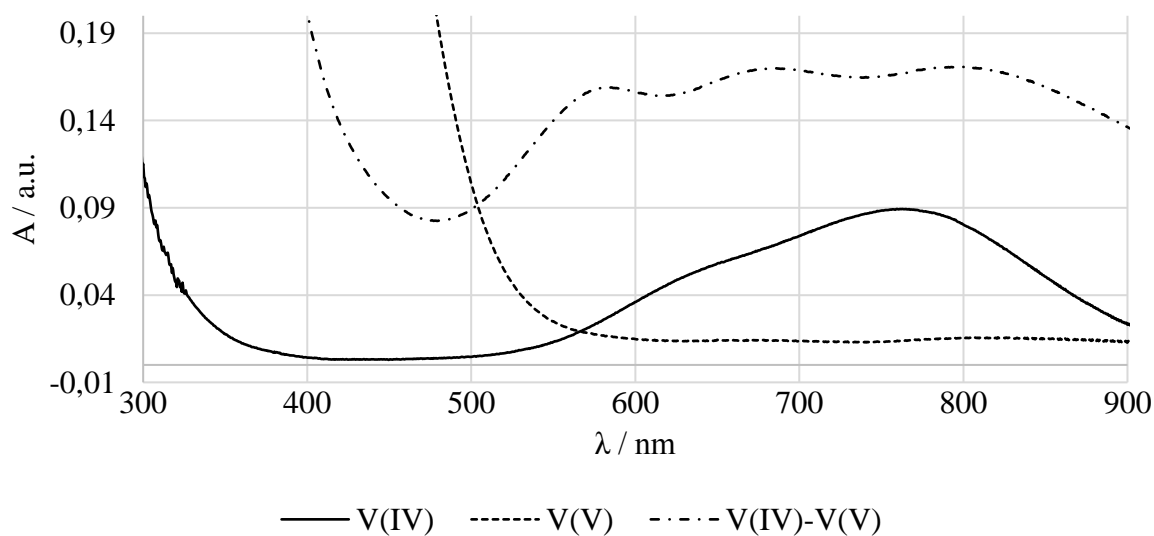


Abb. 4: photometrische Spektren des  $V^{IV}$ -Elektrolyten, des  $V^V$ -Elektrolyten und des  $V^{IV}$ - $V^V$ (1:1)-Elektrolyten in Nafion<sup>TM</sup>

Die gemessenen Spektren stimmen mit der in der Literatur beschrieben für den reinen Elektrolyten überein [8,9].

Die aufgenommenen Spektren zeigen, dass alle V-Spezies in Nafion™ hinein diffundieren und somit auch alle einen Diffusionskoeffizienten besitzen. Zusätzlich ist zu erkennen, dass  $V^{IV}$  und  $V^V$  nicht nur einzeln, sondern in einer Mischung als Dimer in die Membran diffundieren. Dabei stellt sich die Frage, wie groß der Diffusionskoeffizient des Dimers ist und wie stark der Einfluss des Dimers auf das V-Crossover ist. In bisher publizierten Computer-Simulationen einer VRFB von Knehr et al. [5] und Oh et al. [14] wurde der Diffusionskoeffizient des Dimers nicht in Betracht gezogen.

Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass sich die Photometrie nicht nur zu Speziation im Elektrolyten eignet, sondern auch zur Speziation direkt in der Membran.

### *3.4 V-Speziation in Nafion™ mittels XANES*

Eine weitere Methode zur Speziation von V in Feststoffen ist die XANES. Mit Hilfe der XANES ist es möglich die V-Spezies direkt zu bestimmen und Rückschlüsse auf die Koordinationsgeometrie zu erhalten, sowie quantitative Aussagen zu treffen. Normalerweise werden solche Messungen an einem Synchrotron durchgeführt. Jia et al. [11] haben erfolgreich XANES-Spektren von Elektrolyten aufgenommen. Der Zugang zu Synchrotrons ist aber normalerweise eingeschränkt. Die hier gezeigten Messungen stammen von einem Labor-Prototyp. In Abb. 5 sind die XANES-Spektren des  $V^V$ -Elektrolyten in Nafion™ sowie von einer V-Folie abgebildet. In diesen ersten Versuchen war vor allem wichtig festzustellen, ob das Spektrometer empfindlich genug ist, um die niedrigen Konzentrationen in der Membran nachzuweisen.



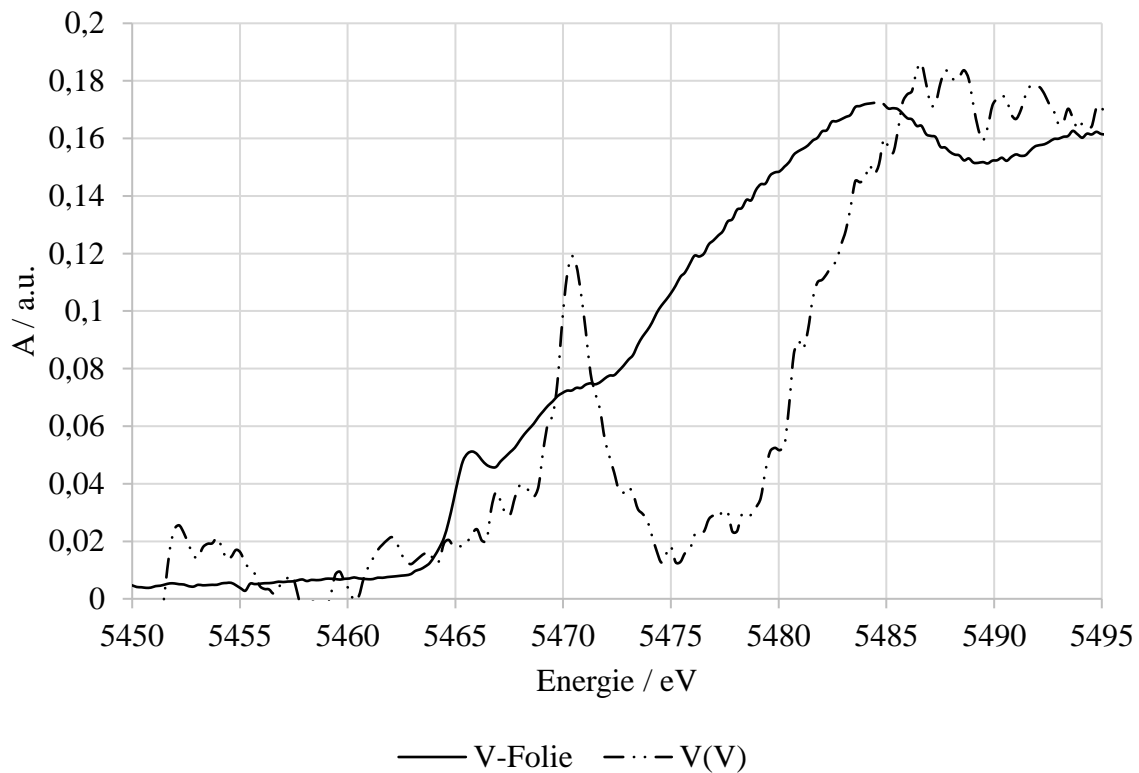


Abb. 5: XANES-Spektren des  $V^V$ -Elektrolyten in Nafion<sup>TM</sup> und einer V-Folie

Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die bestimmte V-Konzentration in Nafion<sup>TM</sup> ausreicht um ein XANES-Spektrum aufnehmen zu können. Zusätzlich stimmen die Spektren mit Jia et al. [11] überein. Während der Messungen wurden gelbliche Verfärbungen der Membranen festgestellt. Diese könnte von einer Reaktion induziert durch Röntgenstrahlung hervorgerufen sein. Die Verfärbung muss nicht zwingend im Zusammenhang mit dem V stehen. Almeida et al. [15] hat ähnliche Beobachtungen an hydrierter V-freien Nafion<sup>TM</sup> festgestellt.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die XANES für die Speziation von V in Nafion<sup>TM</sup> und auch anderen Membranen ein hohes Potential hat.

#### 4. Ausblick

In Zukunft werden wir die Aufnahme unterschiedlichen schwefelsauren Lösungen und V-Elektrolyten in Nafion<sup>TM</sup> weiter untersuchen. Außerdem werden wir einen Teil unserer Arbeit auf die Speziation von Vanadium mittels XANES fokussieren. Dazu wird im nächsten Schritt die Wechselwirkung zwischen Nafion<sup>TM</sup> und Röntgenstrahlung sowie zwischen Nafion<sup>TM</sup> hydriert mit V-Elektrolyt und Röntgenstrahlung untersucht.

## Literatur

- [1] Noack, J.; Roznyatovskaya, N.; Herr, T.; Fischer, P.: The Chemistry of Redox-Flow Batteries. *Angew. Chemie - Int. Ed.* 54 (2015), S. 9776–9809.
- [2] Skyllas-Kazacos, M.; Cao, L.; Kazacos, M.; Kausar, N.; Mousa, A.: Vanadium Electrolyte Studies for the Vanadium Redox Battery—A Review. *ChemSusChem*. 9 (2016), S. 1521–1543.
- [3] Sun, C.; Chen, J.; Zhang, H.; Han, X.; Luo, Q.: Investigations on transfer of water and vanadium ions across Nafion membrane in an operating vanadium redox flow battery. *J. Power Sources* 195 (2010), S. 890–897.
- [4] Luo, Q.; Li, L.; Nie, Z.; Wang, W.; Wei, X.; Li, B.; Chen, B.; Yang, Z.: In-situ investigation of vanadium ion transport in redox flow battery. *J. Power Sources* 218 (2012), S. 15–20.
- [5] Knehr, K. W.; Agar, E.; Dennison, C. R.; Kalidindi, A. R.; Kumbur, E. C.: A Transient Vanadium Flow Battery Model Incorporating Vanadium Crossover and Water Transport through the Membrane. *J. Electrochem. Soc.* 159 (2012), S. 1446–1459.
- [6] Gandomi, Y. A.; Aaron, D. S.; Mench, M. M.: Coupled Membrane Transport Parameters for Ionic Species in All-Vanadium Redox Flow Batteries. *Electrochim. Acta* 218 (2016), S. 174–190.
- [7] Elgammal, R. A.; Tang, Z.; Sun, C.-N.; Lawton, J.; Zawodzinski, T. A.: Species Uptake and Mass Transport in Membranes for Vanadium Redox Flow Batteries. *Electrochim. Acta* 237 (2017), S. 1–11.
- [8] Buckley, D. N.; Gao, X.; Lynch, R. P.; Quill, N.; Leahy, M. J.: Towards Optical Monitoring of Vanadium Redox Flow Batteries (VRFBs): An Investigation of the Underlying Spectroscopy. *J. Electrochem. Soc.* 161 (2014), S. 524–534.
- [9] Choi, N. H.; Kwon, S. -k.; Kim, H.: Analysis of the Oxidation of the V(II) by Dissolved Oxygen Using UV-Visible Spectrophotometry in a Vanadium Redox Flow Battery. *J. Electrochem. Soc.* 160 (2013), S. 973–979.
- [10] Blanc, P.; Madic, C.; Launay, J. P.: Spectrophotometric Identification of a Mixed-Valence Cation-Cation Complex between Aquadioxovanadium(V) and Aquaioxovanadium(IV) Ions in Perchloric, Sulfuric, and Hydrochloric Acid Media. *Inorg. Chem.* 21 (1982), S. 2923–2928.
- [11] Jia, C.; Liu, Q.; Sun, C.-J.; Yang, F.; Ren, Y.; Heald, S. M.; Liu, Y.; Li, Z.-F.; Lu, W.; Xie, J.: In Situ X-ray Near-Edge Absorption Spectroscopy Investigation of the

- State of Charge of All-Vanadium Redox Flow Batteries. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 6 (2014), S. 17920–17925.
- [12] Kusoglu, A.; Weber, A. Z.: New Insights into Perfluorinated Sulfonic-Acid Ionomers. *Chem. Rev.* 117 (2017), S. 987–1104.
- [13] Onishi, L. M.; Prausnitz, J. M.; Newman, J.: Water-Nafion Equilibria. Absence of Schroeder's Paradox. *J. Phys. Chem. B* 111 (2007), S. 10166–10173.
- [14] Oh, K.; Won, S.; Ju, H.: A comparative study of species migration and diffusion mechanisms in all-vanadium redox flow batteries. *Electrochim. Acta* 181 (2015), S. 238–247.
- [15] Almeida, S. H.; Kawano, Y.: Effects of X-ray radiation on Nafion membrane. *Polym. Degrad. Stab.* 62 (1998), S. 291–297.

## **Autorenanschriften**

Christian Lutz

Technische Universität Clausthal

Institut für Anorganische und Analytische Chemie

Arnold-Sommerfeld-Str. 4

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-723642

E-Mail: christian.lutz@tu-clausthal.de

Prof. Dr. Ursula E. A. Fittschen

Technische Universität Clausthal

Institut für Anorganische und Analytische Chemie

Arnold-Sommerfeld-Str. 4

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-722205

E-Mail: ursula.fittschen@tu-clausthal.de